

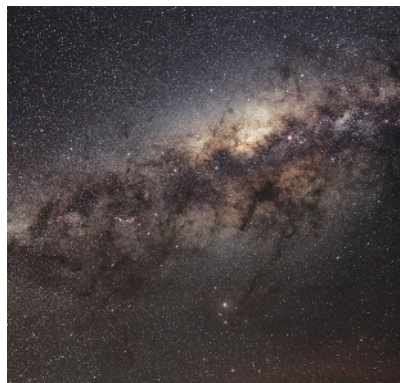
CHOIX DE MESURE INDÉPENDANTS ET SUPERDÉTERMINISME

Dans les expériences de physique quantique de type tests de Bell, comme l'expérience GHZ, les chercheurs obtiennent des corrélations entre les résultats de mesures choisies et effectuées en plusieurs points de l'espace, corrélations inexplicables si l'on admet le principe de localité et celui de l'indépendance du choix des mesures.

Les choix de mesures reposent sur une composante aléatoire, comme un tirage à pile ou face. On pourrait rétorquer qu'après tout, un résultat de lancer de pièce n'est pas aléatoire : il dépend de la façon de lancer, des mouvements d'air autour de la pièce, etc. Une façon d'expliquer les corrélations en conservant le principe de localité serait alors de révoquer le principe de l'indépendance du choix de la mesure. Mais cela n'est pas si simple. Même si les tirages à pile ou face réalisés pour choisir les mesures sont déterminés par certaines causes, il faudrait, pour expliquer l'expérience GHZ, que ces causes conspiraient de façon « intelligente » pour reproduire le résultat prévu par la physique quantique. Dans l'expérience GHZ transposée aux chats et décrite par les auteurs, il faudrait qu'une cause commune détermine à la fois les chats qui entrent dans les détecteurs de l'expérience et les résultats des tirages à pile ou face, de telle façon que les

résultats des mesures effectuées soient exactement conformes aux prédictions de la théorie. On parle alors d'explication « superdéterministe ». Pour expliquer les expériences de Bell, ce « déterminisme intelligent » doit être finement réglé à travers tout l'Univers pour ne pas être mis en défaut.

Concrètement, les expériences de Bell actuelles utilisent des générateurs de nombres aléatoires en tirant leur aléa de sources aussi variées que des fluctuations dans la lumière émise par des lasers, le rayonnement émis par des quasars il y a des milliards d'années, les bits issus de la numérisation de vieux films hollywoodiens, les décimales de π ...



Dans le cadre superdéterministe, pour expliquer ces expériences, il faudrait ainsi prétendre qu'il existe un lien entre elles et le réalisateur Martin Scorsese ou la lumière des quasars ! Cette vision « conspirationniste » de la physique amène très rapidement à affirmer que « tout est écrit à l'avance ». Or une telle affirmation n'est pas réfutable, donc sort du cadre de la science, et l'on peut se demander quel sens donner aux lois physiques si tout est déjà écrit. La plupart des physiciens refusent cette piste ; ils admettent, de façon implicite, le principe de l'indépendance du choix de la mesure, ou plus exactement d'une expérience non superdéterministe.

En 2017, dans leur expérience de Bell, au lieu de tirer à pile ou face avec des pièces, l'équipe d'Anton Zeilinger, de l'université de Vienne, a utilisé la lumière de deux étoiles distantes de plus de 500 années-lumière : les chercheurs effectuaient un type de mesure ou un autre selon que la fréquence des photons issus des astres était supérieure ou inférieure à une valeur donnée. Selon le superdéterminisme, certaines causes auraient réglé finement les émissions lumineuses des deux étoiles il y a plus de 500 ans pour que les résultats de l'expérience de physique soient compatibles avec les prédictions de la physique quantique. En utilisant des quasars, on pourrait repousser cette logique à plusieurs milliards d'années...

formalisme de la mécanique quantique. Les trois chercheurs ont démontré que, selon ce formalisme, un événement survenant à un endroit peut avoir une influence instantanée sur la description mathématique d'un autre système physique, à distance, ce qui semble être en contradiction avec le principe de localité (qui n'était pas encore conceptualisé dans sa formulation moderne).

Pour Einstein et ses collègues, cette conclusion était le signe que la théorie quantique était incomplète, et qu'il devait exister une théorie alternative conduisant aux mêmes prédictions, mais en évitant ce paradoxe apparent. Cependant, pour le physicien danois Niels Bohr, l'un des principaux fondateurs de la mécanique quantique, il fallait accepter cette étrangeté dans le formalisme de la théorie quantique, qui ne débouchait sur aucune contradiction en pratique.

Pendant plusieurs décennies, aucun argument théorique ni aucune expérience n'ont permis de résoudre cette controverse, mise de côté par la plupart des physiciens puisqu'elle n'affectait pas leurs travaux au quotidien. En 1964, le Nord-Irlandais John Bell a fait progresser la situation de façon cruciale. Alors qu'il cherchait une théorie qui réconcilierait

les prédictions de la physique quantique et ce que nous nommons maintenant la localité, il a démontré un résultat exactement opposé, qui a mené à l'un des théorèmes de physique fondamentale les plus importants, révolutionnant notre vision du monde. Reformulé dans la décennie suivante, ce théorème prouve qu'aucune théorie conduisant aux mêmes prédictions que la physique quantique ne peut être compatible à la fois avec le principe de localité et avec celui de l'indépendance du choix de la mesure. Ce théorème a ouvert la voie à des tests concrets, dits « expériences de Bell », qui mettent en défaut la conjonction de ces deux principes.

En réalité, il existe de nombreuses expériences de Bell. Celle discutée à l'origine par Bell est une expérience de pensée, sans indications sur la façon de la réaliser en pratique, avec les moyens techniques de l'époque. Elle est aujourd'hui connue sous le nom d'expérience CHSH, du nom des physiciens américains John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony et Richard Holt qui en proposèrent la première procédure expérimentale. Elle met en jeu deux expérimentateurs effectuant des mesures en deux lieux distincts. Elle a l'avantage d'être relativement simple à réaliser.

LES CHATS QUANTIQUES DE L'EXPÉRIENCE GHZ

Dans l'expérience GHZ, une source envoie simultanément trois photons intriqués à trois scientifiques, Aïda, Béatrice et Camélia. Celles-ci réalisent simultanément une mesure unique de polarisation dans une certaine direction, parmi deux possibles. On choisit ici de renommer les photons « chats » et la polarisation « couleur », soit sur le pelage (P), soit sur les yeux (Y), qui peuvent être soit verts (v), soit roses (r). Chaque expérimentatrice décide quoi mesurer par un tirage à pile ou face, sans communiquer son choix aux autres. La mécanique quantique prédit deux situations pour les résultats. Lorsque toutes les scientifiques mesurent P , elles trouvent un nombre impair (1 ou 3) de résultats v , et donc un nombre pair (0 ou 2) de résultats r . Lorsque l'une mesure P et les deux autres mesurent Y , elles trouvent un nombre pair (0 ou 2) de résultats v , et donc un nombre impair (1 ou 3) de résultats r . Les observations confirment ces prédictions.

En s'appuyant sur son intuition classique et macroscopique, notamment sur le principe de localité, un détective peut-il expliquer les résultats des mesures ? Son raisonnement l'amène à penser que la source au centre de l'expérience contient des chats verts ou roses, avec des yeux verts ou roses, c'est-à-dire avec des couleurs bien déterminées. À chaque fois, trois de ces chats parviennent aux appareils de mesure

des trois scientifiques. Il peut ainsi énumérer les 64 possibles configurations de trois chats soumises aux trois scientifiques. Considérons par exemple l'une de ces 64 configurations, représentée sur l'illustration, celle où Aïda reçoit un chat rose aux yeux verts, et Béatrice et Camélia des chats verts aux yeux roses. Suivant le résultat des tirages de pile ou face, plusieurs mesures sont possibles. Si, comme dans l'illustration, Aïda et Béatrice mesurent les yeux et Camélia mesure

résultats verts, ce qui est contraire aux prédictions quantiques et qui n'est jamais observé par le détective !

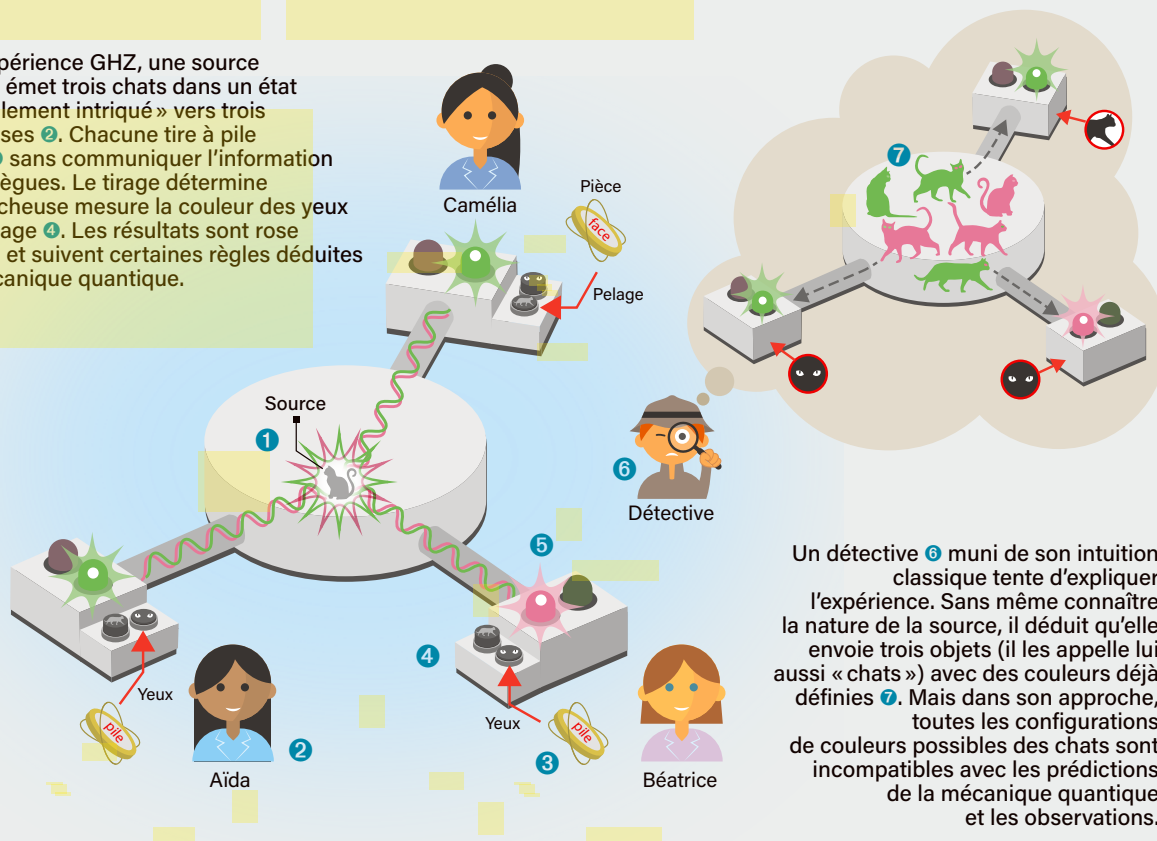
En prenant un par un les 64 cas possibles, comme nous venons de le faire avec un cas particulier, notre détective (ou un lecteur motivé) montre aisément, de la même façon, qu'aucune de ces possibilités n'est compatible avec les résultats indiqués par la physique quantique. Pour chaque combinaison possible, il existe toujours un choix de mesures incompatible avec les résultats prédits par la mécanique quantique et observés par le détective. Les résultats de l'expérience ne peuvent donc s'expliquer par aucune des combinaisons possibles.

La conclusion qui s'impose est que la cause des corrélations entre les mesures ne peut être de nature classique, et est nécessairement non locale. Pour tirer cette conclusion, il faut cependant admettre l'hypothèse de l'indépendance du choix de la mesure. Cette hypothèse interdit l'existence d'une cause commune déterminant à la fois la couleur des chats et les résultats des tirages à pile ou face, cause qui pourrait éviter que les trois scientifiques ne mesurent les situations problématiques, comme quand elles mesurent toutes le pelage dans le cas des chats pris en exemple.

La cause des corrélations est nécessairement non locale

le pelage, elles obtiennent un nombre pair de résultats v (plus exactement, deux), ce qui est compatible avec les observations du détective et les prédictions quantiques. C'est toujours le cas tant que deux des chercheuses mesurent les yeux et la troisième mesure le pelage. Cependant, si les trois mesurent le pelage, elles obtiennent un nombre pair (deux) de

Dans l'expérience GHZ, une source unique ① émet trois chats dans un état « maximalement intriqué » vers trois chercheuses ②. Chacune tire à pile ou face ③ sans communiquer l'information à ses collègues. Le tirage détermine si la chercheuse mesure la couleur des yeux ou du pelage ④. Les résultats sont rose ou vert ⑤ et suivent certaines règles déduites de la mécanique quantique.



Un détective ⑥ muni de son intuition classique tente d'expliquer l'expérience. Sans même connaître la nature de la source, il déduit qu'elle envoie trois objets (il les appelle lui aussi « chats ») avec des couleurs déjà définies ⑦. Mais dans son approche, toutes les configurations de couleurs possibles des chats sont incompatibles avec les prédictions de la mécanique quantique et les observations.